



“十二五”国家重点出版物出版规划项目
国家出版基金资助项目
四川省重点出版资金资助项目



集成电路系统科技创新技术 >>>

田书林 叶 芃 等著
曾 浩 刘 科

宽带信号实时捕获 与合成技术

2013年国家技术发明二等奖

电子科技大学出版社



“十二五”国家重点出版物出版规划项目
国家出版基金资助项目
四川省重点出版资金资助项目



集成电路系统科技创新技术 >>>

宽带信号实时捕获 与合成技术

田书林 叶 芃 等著
曾 浩 刘 科

2013年国家技术发明二等奖



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

宽带信号实时捕获与合成技术 / 田书林等著. —成都:
电子科技大学出版社, 2015. 12
ISBN 978-7-5647-3309-4

I. ①宽… II. ①田… III. ①宽带通信系统—信号处
理—研究 IV. ①TN914. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 246182 号

宽 带 信 号 实 时 捕 获 与 合 成 技 术

KUANDAI XINHAO SHISHI BUHUO YU HECHENG JISHU

田书林 叶 芃 曾 浩 刘 科 等著

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号信息产业大厦
邮编: 610051)

总 策 划: 郭蜀燕

责任编辑: 万晓桐

责任校对: 刘 愚

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 四川煤田地质制图印刷厂

成品尺寸: 170mm×240mm 印张 25.5 字数 500 千字

版 次: 2015 年 12 月第一版

印 次: 2016 年 4 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-5647-3309-4

定 价: 68.00 元

■ 版权所有·翻印必究 ■

◆本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83201495。

◆本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

目录 CONTENTS

第1章 概述

1.1 信号捕获与合成技术简介	1
1.2 信号捕获与合成测试仪器	4
1.2.1 信号捕获测试仪器	4
1.2.2 信号合成测试仪器	9
1.3 信号捕获与合成关键技术	12
1.3.1 基于伪插值和自适应综合校正的大规模并行采样技术	13
1.3.2 极高波形捕获率技术	15
1.3.3 高速大容量数据存储与硬件协处理技术	16
1.3.4 多通道精密信号同步技术	18
1.4 国内外研究现状	20
1.4.1 信号捕获技术研究现状	20
1.4.2 信号合成技术研究现状	25

第2章 高速数据采集与实时存储技术

2.1 高速模数转换器概述	30
2.2 高速数据采集系统基本原理	31
2.3 实时采样与随机采样技术	32
2.3.1 实时采样技术	32
2.3.2 随机采样	33
2.4 并行采样技术	36
2.4.1 基于HFB的并行采样	38
2.4.2 两种并行采样结构的关系	40
2.5 触发技术	40
2.5.1 问题产生的原因	40



2.5.2 自适应智能触发技术及模型	44
2.6 采集系统的数据同步	47
2.6.1 多 ADC 高速数据采集系统的数据同步识别装置	47
2.6.2 基于聚类分析时间交替采样系统数据同步辨识	51
2.7 高速海量波形存储技术	59
2.7.1 传统深存储技术的缺陷	59
2.7.2 高速波形海量存储技术	61

第3章

宽带信号实时处理与显示技术

3.1 信号处理与显示概述	68
3.2 大规模并行采样的非均匀校正方法	72
3.2.1 非均匀误差频谱分析	72
3.2.2 通道失配误差自适应估计及重构	76
3.2.3 通道失配误差的正弦拟合与基于统计的估计算法	98
3.2.4 TIADC 系统中的误差校准	106
3.3 模拟带宽的频域补偿技术	125
3.3.1 频率响应补偿方法	125
3.3.2 通道响应补偿验证	134
3.4 无缝捕获与波形三维显示技术	136
3.4.1 基于信息熵的无缝捕获技术	136
3.4.2 波形三维显示技术	154

第4章

信号调理技术

4.1 信号调理的概念	181
4.2 信号调理技术基本原理	181
4.3 宽带信号调理的关键技术	182
4.3.1 宽带阻抗变换电路	183
4.3.2 通道偏置调节电路	186



4.3.3	可变增益电路	190
4.3.4	高速并行 ADC 驱动电路	191
4.4	触发通道	192
4.5	驱动与采样保持技术	194
4.5.1	采样保持器原理	194
4.5.2	采样保持器提高系统性能	198

第5章 复杂信号合成技术

5.1	信号合成的概念	203
5.2	任意波形合成的基本原理	204
5.2.1	DDWS 直接数字波形合成技术	205
5.2.2	DDFS 直接数字频率合成技术	205
5.3	任意波形合成技术及发展趋势	206
5.3.1	DDS 采样模型	206
5.3.2	提高采样率	211
5.3.3	提高存储容量	216
5.3.4	DDS 误差分析与改善	223
5.4	基于频域扩展的伪插值并行方法	243
5.4.1	伪插值任意波形合成技术	243
5.4.2	伪插值任意波形合成误差分析及校正	246
5.5	精密时钟分配与内嵌相位校准技术	272
5.5.1	多通道任意波形合成相位控制方法分析	273
5.5.2	多通道精密同步技术	276

第6章 脉冲波形合成技术

6.1	研究背景	282
6.1.1	波形合成技术	283
6.1.2	快沿脉冲技术	284
6.1.3	信号调理技术	285
6.2	脉冲波形特征与信息合成方法	286



6.2.1	时域波形	286
6.2.2	脉冲频谱分析	288
6.2.3	脉冲信号带宽分析	289
6.3	脉冲波形频率特征合成技术	297
6.3.1	时钟频率合成分析	297
6.3.2	数字式频率特征合成方法	300
6.3.3	延迟定时与脉宽精调技术	305
6.4	快沿产生技术研究	309
6.4.1	概述	309
6.4.2	阶跃恢复二极管快沿整形电路设计	309
6.4.3	非线性传输线沿压缩技术	310
6.5	脉冲波形功率特征合成与沿控制技术研究	318
6.5.1	非线性调理技术	319
6.5.2	边沿控制技术研究	325

第7章 捕获与合成技术的应用

7.1	捕获类和合成类测试仪器	331
7.1.1	宽带数字存储示波器设计	331
7.1.2	高采样率任意波形发生器设计	344
7.1.3	高速脉冲发生器设计	359
7.2	机载防撞测试系统的应用	381
7.2.1	主要功能	382
7.2.2	系统的方案及工作原理简述	383
7.3	信号捕获与合成系统关键指标的测试方法	384
7.3.1	基于双脉冲法的数字存储示波器波形捕获率测试方法	385
7.3.2	基于步进幅频组合脉冲的数字示波器捕获率测试方法	387
	参考文献	395

第1章

概 述

1.1 信号捕获与合成技术简介

门捷列夫曾经说过，“科学是从测量开始的。”随着科学技术的飞速发展，航空航天设备、军用武器系统等高技术产品的复杂程度日益提高。待测参数数量和种类的增加，测试精度要求的提高，测试时间的严格要求，使得传统的人工检测手段已经无法满足现代化装备测试的要求，自动测试系统正逐步成为复杂系统与设备研制、验收、运行的必要保障。典型的自动测试系统主要由待测系统、激励信号源、参数获取装置以及相关的控制器、测试总线构成，如图1-1所示。

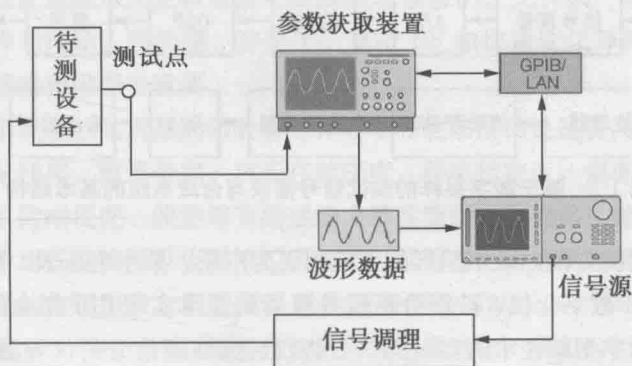


图 1-1 典型的自动测试系统组成

随着现代电子技术，特别是军事电子技术革新带来的新体制武器装备的发展与应用，电子信号呈现出高度复杂化的发展趋势，主要体现在：信号频率上限、信号带宽和调制带宽不断拓展，调制种类不断增加，信号波形任意化趋势加剧，信号频率分辨率和捷变速率大幅提高。这一趋势，对作为电子测试领域两大根本的测试信号捕获与合成技术，以及相应的电子测试仪器，都提出了新的挑战。



同时,科学研究和重大工程面对大量诸如深空探测、模拟核爆、战场环境下雷达回波等瞬态复杂信号。它们带宽极高、波形特征丰富,实时捕获(采集和处理)是获取其重要信息的前提;同时,产生信号的真实场景往往难以复现或风险代价极高,通过信号合成技术进行模拟至关重要。这些都对信号实时捕获与合成技术及相关科学仪器提出了迫切的需求。

由于信号本身的复杂性和测试应用目的的差异性,无论是测试信号合成还是获取,所涉及的研究领域和覆盖的技术范围都非常宽泛,单个研究者毕其一生也往往难尽一二。但是,随着数字化技术的不断发展,采样技术在测试信号捕获与合成中得到了广泛的应用,图 1-2 给出了基于数字采样的测试信号捕获与合成系统的基本结构。从理想角度看,信号捕获与合成是一个互逆的过程,所涉及的技术是完全统一的。如果 ADC、DAC 的转换速率和精度足够,其他器件工作速率匹配,采样技术可解决除输入/输出通道外测试信号合成与获取的几乎全部问题。尽管由于器件限制等原因,事实上数字采样技术并不能包打天下,目前主要依赖该技术的电子测试仪器在实现上也还有限,但它代表着未来测试仪器的技术发展方向,已经并将持续成为信号捕获与合成的研究热点之一。

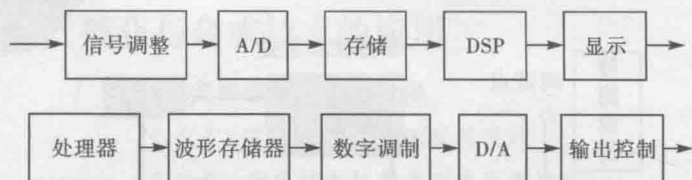


图 1-2 基于数字采样的测试信号捕获与合成系统的基本结构

在信号捕获方面,数字采样技术应用更为广泛,数字电压表、数字存储示波器(DSO)、数字化仪、波形分析仪等仪器的技术实现几乎完全依赖采样技术;而基于数字中频技术的实时频谱分析仪、无线通信分析仪等测试仪器中,数字取样和实时信号处理技术已成为整个技术体系中的核心。而且,随着 A/D 取样速率和精度的不断提升以及 DSP 理论与技术的日益成熟,射频/微波测试仪器的实现技术也正从以传统扫频技术为核心向以数字取样和实时处理技术为核心转变,基于实时采样的时域测试仪器,如数字示波器、高精度数字化仪等正在成为现代电子仪器的主流发展方向,孕育着电子仪器体系和测量方法的重要变革。

高实时采样率和高采样精度同样也是信号捕获技术中亘古不变的追求,它表征系统捕获宽带、瞬态和大动态范围信号的能力。在技术侦察等军事应用



中,需要一次尽可能多地捕获信号,因此能够在最高采样率下进行连续存储的高速大容量存储系统,对信号分析至关重要。在以数字存储示波器为代表的实时观测仪器中,由于处理和显示时间的存在,无法实现“无缝捕获”(不间断采样),传统数字示波器采样捕捉时间通常只占总观测时间的2%左右,这意味着在“盲区时间”将会漏掉98%的波形细节,几乎不可能观测信号中的偶发事件。因此,如何提高波形捕获率也是时域测试中一个重要的研究课题。在多通道数据采集应用中,通道之间的精密同步十分关键。例如,通过辐射源电磁频谱对目标进行测向定位,要求通道之间同步能力达到100ps左右,这一接近传输路径基底抖动的指标限制,仅靠布线布局和精密调整手段显然无法逾越。

在信号合成方面,由于受DAC转换速率和固有特性限制,采用数字采样技术产生波形的最高频率和频谱纯度都较低,其应用受到一定限制。但由于传统信号合成方式难以穷尽测试所需的千差万别的复杂波形,数字取样技术在任意信号合成中成为不可替代的选择,其核心是数字直接频率合成(DDS)技术。基于DDS技术产生任意信号合成技术具有频率分辨率高、频率切换速率快、频率切换时相位保持连续等优点,在通信、雷达及对抗等领域得到了广泛应用。高性能任意波形发生器能够生成或复现理想的、无失真“现实”信号,产生具有噪声和抖动、预加重、多电平、宽带RF和快速变化等特性的信号,在设计和测试流程中至关重要。

随着电子设备,尤其是武器装备工作频率和复杂度的迅速提高,对任意波形发生器的采样率、波形带宽、波形存储深度、频率稳定性、幅度精度、信号失真度、边沿陡峭程度、波形细节描述能力等性能指标都提出了越来越高的要求。例如,使用任意波形发生器模拟叠加了干扰信息的雷达视频信号是验证雷达接收机性能的常用手段,但要满足雷达视频信号(30~50)MHz带宽,更好地模拟“真实”干扰情况,需要任意波形发生器具备400MHz以上的信号带宽和1Gsps以上的最高采样率;在技术侦察和对抗应用中,还希望波形精度尽可能高、波形持续时间尽可能长。但DAC、存储器等关键器件的工作速率瓶颈,极大地制约了高速高性能信号合成技术的发展。目前,高速信号合成技术的研究重点和难点主要在于:如何尽可能提高合成波形的质量;如何不断提高采样率和采样精度;如何实现大容量的波形存储和波形编辑;如何快速、灵活地产生各种复杂的调制信号。

由此可见,高采样率、高精度、高捕获率、高速大容量存储和通道精密同步等技术是目前高速信号捕获和产生技术研究中的几大难题。

上述种种难题极大地制约着高速信号捕获和产生技术以及相关测试仪器的发展和应用。在我国,由于研究水平上的差距、集成电路工业的整体滞后和西方国家的限制等原因,体现尤为突出。

1.2 信号捕获与合成测试仪器

1.2.1 信号捕获测试仪器

自然界运行着各种形式的波,比如海浪、地震、声波、爆破、空气中传播的声音,或者身体运转的自然节律等等。物理世界里,能量、振动粒子和不可见的力无处不在。即使是光(波粒二象物质)也有自己的基频,并因为基频的不同呈现出不同的颜色。人类对客观事物的认知从未停止,研究方法多种多样,其中测量是主要方法之一,也是一切科学的基础。通过传感器将声音、机械应力、压力、光、热等物理激励源转变为电信号,再通过电子仪器进行观察和测量是人类研究各种物理现象最简便和有效的手段。

示波器是信号捕获类测试仪器的典型代表,也是电子测量领域中的常用仪器,它用于观察、测量和记录各种瞬时物理现象,并通过波形方式,显示出物理现象与时间的二元关系。其实质就是一台图形显示设备,通过它描绘出的电信号的波形曲线可直观揭示出诸如信号的时间和电压、频率、噪声、AC和DC成分、失真等信息。它是用途最广泛的测试仪器,是基础科学仪器的代表,也是国家仪器制造水平的重要标志。从科学家、工程师到教育工作者和电器维修人员,从科学研究、技术发明到生产制造和产品维护,示波器都被广泛使用,并且必不可少。例如,汽车工程师使用示波器来测量发动机振动,医师使用示波器测量脑电波,军事上使用示波器来进行武器射击瞬态捕获,通信上使用示波器进行信号分析等。

示波器作为对信号波形进行直观观测和测量的电子仪器,其发展历程与整个电子技术的发展息息相关。按照出现时间的先后,示波器技术的发展经历了从模拟实时示波器(Analog Real-Time Oscilloscopes, ART)到数字存储示波器(Digital Storage Oscilloscopes, DSO),再到数字三维示波器(Digital Three-dimension Oscilloscopes, DTO)的过程。

首先,阴极射线管(CRT)的发明为示波器能够直观显示波形奠定了基础,它是1878年由英国W. 克鲁克斯发明的,至今有一百多年历史。但直到1934年,B. 杜蒙发明的137型示波器,才被称为现代示波器的雏形。随后,国外创立的许多仪器公司成为示波器研究和生产的主要厂商,对示波器的研究和生产起到了很大的推动作用。

示波器的发展过程大致可以分为三个阶段。

(1) 模拟示波器

20 世纪 30~50 年代是模拟示波器诞生和实用化阶段,在这个阶段诞生了许多种类的示波管,如通用的模拟示波器,记忆示波器——一种为观测高频周期信号的取样示波器,并已达到实用化。但由于当时的技术水平,示波器的带宽仍很有限,1958 年时模拟示波器的最高带宽达到 100MHz,而我国第一台电子示波器也在此时诞生了。20 世纪 60 年代是技术水平不断提高的阶段。如模拟示波器带宽从 100MHz,150MHz 到 300MHz,取样示波器的带宽达到了 18GHz。

模拟示波器的 X、Y 通道对时间信号的处理均由模拟电路完成,整个处理均采用模拟方式进行,即 X 通道提供连续的锯齿波电压,Y 通道提供连续的被测信号,它们均为连续信号,而 CRT 屏上的图形显示也是光点连续运动的结果,即显示方式是模拟的。

模拟示波器可分为通用示波器、多束示波器、取样示波器、记忆示波器和专用示波器等。通用示波器采用单束示波管,它根据能在荧光屏上显示出的信号数目,可分为单踪、双踪、多踪示波器。多束示波器又称多线示波器,它采用多束示波管,荧光屏上显示的每个波形都由单独的电子束扫描产生,能同时观察、比较两个以上的波形。

将要观察的信号经衰减、放大后送入示波器的垂直通道,同时用该信号驱动触发电路,产生触发信号送入水平通道,最后在示波管上显示出信号波形。这是最为经典且传统的一类示波器,因此,也常称为通用示波器,其内部电路均为模拟电路。在 100MHz 以下的示波器中,模拟示波器占多数,且具有较高的性价比。

取样示波器是采用时域处理技术将高频周期信号转换为低频离散时间信号显示的,从而可以用较低频率的示波器测量高频信号。由于信号的幅度尚未量化,这类示波器仍属模拟示波器。

记忆示波器采用有记忆功能的示波管,实现模拟信号的存储、记忆和反复显示,特别适宜观测单次瞬变信号。

专用示波器是能够满足特殊用途的示波器,又称特种示波器。如矢量示波器、心电图示波器、电视示波器、逻辑示波器等。

(2) 数字存储示波器

数字示波器是 20 世纪 70 年代初发展起来的一种新型示波器。数字示波器对 X、Y 方向的信号进行数字化处理,即把 X 轴方向的时间离散化,Y 轴方向



的幅值量化,获得被测信号波形上的一个个离散点的数据。

1972年英国的 Nicolet 公司发明了第一台数字存储示波器(DSO)。数字存储示波器采用了微处理器进行控制和数据处理,因此具有超前触发、毛刺捕捉、波形处理、长时间波形存储等模拟示波器所不具备的功能。进入20世纪80年代,随着现代测试技术的不断发展,在电子信号测量领域中对各类微弱信号、高频信号或复杂信号进行快速、精确的测量的要求越来越高,功能方面除了对信号电压、频率、周期等常见参数的测量外,还要求能够提供诸如信号幅值概率分布、信噪比、抖动、频响函数等复杂的波形参数测量。模拟示波器的性能已不能满足测试需要。与此同时,高速ADC技术的快速发展促使了数字存储示波器的异军突起,大有全面取代模拟示波器之势。到了90年代,数字示波器带宽已提高到1GHz以上,性能全面超越了模拟示波器。在这一时期,美国的泰克和惠普公司都对数字示波器技术的发展做了重要贡献,随着他们对模拟示波器的停产,模拟示波器逐渐退出了历史舞台。尽管如此,DSO仍然有不足之处,其有限的波形捕获速率、缺少了亮度等级的波形显示,使其捕获毛刺、观测信号概率分布等能力较低。

(3) 第三代数字存储示波器

模拟示波器用阴极射线管显示波形,示波管的带宽与示波器相同,亦即示波管内电子运动速率与信号频率成正比,信号频率越高,电子速率越快,而示波管屏幕的亮度与电子束的速率成反比,低频波形的亮度高,高频波形的亮度低。因此,利用荧光屏幕的亮度或灰度可以很容易获得信号的第三维信息。这种与时间有关的荧光余辉效应对观察混合波形和偶发波形十分有效。而数字存储示波器由于是数字处理,它只有两个状态,非高即低,原则上波形只有“有”和“无”两种显示,没有灰度和余辉显示功能。因此,数字示波器技术又开始朝着模拟化方向发展,尽量去吸收模拟示波器的优点,数字模拟多层次亮度变化的荧光效果。数字三维示波器(DTO)应运而生。

泰克公司于1999年开始推出并迅速发展的新一代示波器平台——数字荧光示波器(Digital Phosphor Oscilloscope, DPO),是数字三维示波器的典型代表。DPO不但具备数字存储示波器的数据存储和分析、先进的触发等功能,而且具有和模拟实时示波器相当的波形捕获速率和辉度等级显示,能以数字形式模拟亮度渐次变化的化学荧光效果。它成功融合了模拟领域和数字领域的优势,在实验室和工业现场等高端测试领域中大显身手。

数字示波器通过模数转换器(ADC)把被测电压转换为数字样值并存储,再通过处理器重构波形。数字示波器与模拟示波器相比有着显著的优点,它不



但具有高带宽、高采样率等特点,还具有波形存储、参数测量、信号分析、自动设置以及丰富的触发等功能。随着 ADC 取样带宽的增长和数字信号处理 (DSP) 理论技术的日益成熟,基于实时采样的数字示波器逐渐成为现代测试仪器的主流。

数字示波器的核心技术是信号获取与处理。随着信号带宽、非平稳特性以及信息量的急速增长,信号的高速获取与实时处理成了测试领域公认的国际难题和研究热点。具体而言,足够的高速、高精度采样性能以及信号实时捕获能力是满足宽带、瞬态和无缝等现代测量需求的关键。

示波器的采样性能主要取决于 ADC 等关键器件的指标。国内对 ADC 的研究因受到材料、芯片工艺等因素的制约,限制了其技术指标的快速提升。目前,国产 ADC 速率仅能达到 1Gsps,国外允许提供国内市场的 ADC 最高速率也仅为 5Gsps。而一般的超宽带测试,如针对 PCI Express (2.5Gbps) 链路传输的信号完整性测试,需要测试 3~5 次谐波,采样率至少要求 20Gsps。由此可见,高速 ADC 器件发展水平滞后是阻碍我国高端测试仪器进步的主要因素。解决这一核心问题的办法主要有两个:一是加大在集成电路技术上的研究投入,力争尽快提高国产 ADC 等器件的性能指标;二是加快对大规模并行采样非均匀和非一致性问题的研究进度,力争迅速突破 ADC 等器件的速率限制。

示波器的信号测量能力主要取决于信号高速测量方法、仪器的体系架构、波形重建与显示方法等因素。传统的数字存储示波器,由于采用的是采集、处理、显示串行工作的体系结构,导致其采集死区时间长,波形捕获率很低(通常在 100wfms/s 以内),容易遗失信号细节,错过瞬态事件。同时,DSO 在显示效果上没有如模拟示波器般的辉度等级变化,只能以二维形式(幅度、时间)捕获信号,以单一颜色显示波形,因此无法获取信号出现的概率信息。由此可见,在突破了仪器高速采样性能后,随之而来的问题就是如何尽可能地提高示波器的波形捕获率并改善显示效果,最终提高测试效率。解决这一核心问题需要从研究示波器的体系结构上着手。

数字存储示波器与模拟示波器相比增加了数字环节,加强了触发能力,增加了自动测量功能,并且能够存储捕获的信号。在显示方面采用了液晶显示器,解决了带宽对 CRT 显示器的限制。然而在结构方面,数字存储示波器采用的是一种串行处理的体系结构,如图 1-3 所示。信号经过调理、采样、存储后,需要等待微处理器完成对采集数据的分析运算并处理成波形图像后才能显示,这一过程通常需要花费毫秒级的时间,并且此时系统是不能进行信号采集的,因此数字存储示波器一般存在着毫秒级的死区时间,在这个死区时间内出



现的异常信号将被漏失。而模拟示波器，从信号采集一直到在 CRT 上显示出波形，都是纯粹的模拟通道，仅在扫描的回扫时间及闭锁（holdoff）时间内不采样信号，相比之下，数字存储示波器的波形捕获率远不如模拟示波器。DSO 的波形捕获速率很低，通常在 100wfms/s 以内。

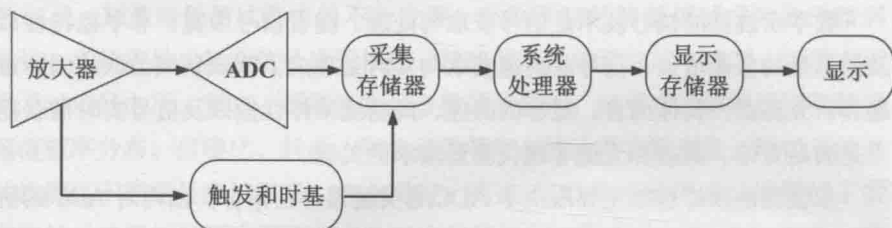


图 1-3 串行工作构架的数字化时域测试仪器

为了从根本上突破串行体系结构的速率瓶颈，减小或彻底消除死区时间，泰克公司推出了以数字荧光技术为核心的第三代示波器 DPO，这是一种数字三维示波器，它基本解决了 DSO 波形捕获率和显示效果两大难题。

数字三维示波器，是以三维数组的形式，即以幅度、时间和振幅随时间变化的分布情况进行数据采集处理、存储及显示。数字三维示波器采用了一种显示单元和数据处理单元并行的架构体系，其结构如图 1-4 所示。基于 ASIC 硬件技术的波形图像处理器专职负责将采集数据高速映射为具有辉度等级的波形图像，并不断地刷新屏幕显示，从而将处理器从显示管理任务中解放出来，并行完成系统控制、数据处理等工作，大大缩短了系统的死区时间，提高了示波器的波形捕获速率。高端 DPO 每秒钟可捕获 400 000 幅波形，超越了模拟实时示波器的极限，其信号数据比一般的 DSO 多数千倍，并且这种三维数组结构还能实现灰度或彩色亮度层次的荧光效果显示。

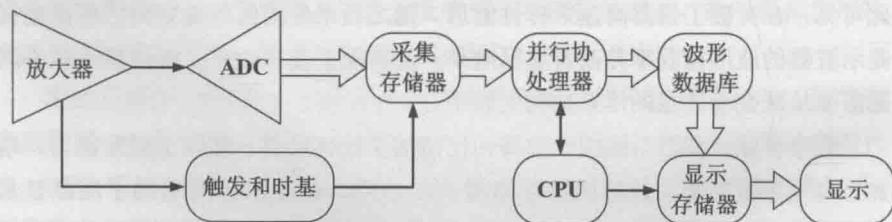


图 1-4 并行工作构架的数字化时域测试仪器结构示意图

这种快速波形捕获速率结合高超的显示能力，使数字三维示波器能够捕捉并显示当今复杂的动态信号中的全部细节和异常情况，增加了证明数字系统中的瞬态事件的可能性。

1.2.2 信号合成测试仪器

在测试系统中,激励信号源作为输入设备,并不直接测试任何参数。其作用是为待测系统提供激励信号,或者产生仿真信号,模拟电子设备所需与实际环境特性相同的信号,其性能指标与待测对象密切相关。随着各种待测系统工作频率、复杂程度越来越高,测试信号激励源也面临着新的挑战。一方面,不仅需要信号激励源具备复杂波形的输出能力;另一方面,还对输出频率、波形质量、输出通道数目以及输出信号之间的同步能力等功能指标提出了更高的要求。

任意波形发生器(Arbitrary Waveform Generator, AWG)是近年来飞速发展起来的一类通用信号源。与传统信号源相比,任意波形发生器的最大优势在于其产生信号的方式灵活。它不仅能产生正弦波、方波等标准波形,还具有输出频率稳定性和分辨率高、频率切换速率快,并且切换时输出波形相位连续等优点。它还可以通过波形编辑软件,根据用户的测试需求仿真被测产品在实际条件下运行时所遇到的“真实世界”信号,生成任意波形激励信号,重演由数字示波器捕获的波形,模拟甚至替代来自某个尚未安装元件的信号或测试过程中难以重复或很难通过元件和传感器生成的信号。例如:在飞机的可行性和稳定性测试中,模拟试机时螺旋桨的运行情况;在军用通信接收机测试中,仿真接收到的信道衰减信号;在低截获概率雷达的应用中,产生复杂且捷变的波形等。目前,任意波形发生器已经取代传统信号源,广泛应用于磁盘驱动器测试、串行数据通信、基带/IF调制测试、汽车防抱死、发动机控制、变频器和生物医学模拟等领域,具有广阔的市场前景。

图1-5是任意波形发生器的主体结构,主要由控制接口模块、任意波形合成模块和信号调理模块三部分组成。其中,控制接口模块提供相应的总线接口和用户接口,管理并调度各功能模块协同工作;任意波形合成模块是任意波形发生器的核心,其实质是如何根据用户的需要产生波形信号,以及在波形确定的情况下如何通过参考频率源产生频率可变的波形;信号调理模块对输出波形进行滤波、幅度控制、偏移控制等处理,一方面保证输出波形的质量,另一方面根据用户的需要调节波形的幅度、偏移等输出参数。

由于传统信号合成方式难以涵盖测试所需的各种复杂波形,数字取样技术成为任意波形合成方法不可替代的选择,其核心是直接数字合成(Direct Digital Synthesis, DDS)技术,原理如图1-6所示。以正弦波信号合成为例,波形查找表中存放一个周期正弦波形的样本数据, N 位的频率控制字 K 在采样时钟的每一个上升沿累加一次,其累加结果截取高 M 位后作为地址对波形查找表进行查

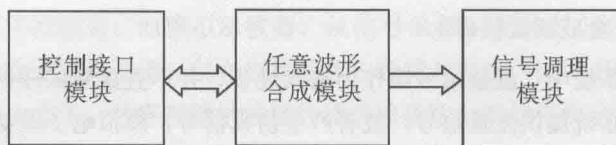


图 1-5 任意波形发生器主体结构

表操作，完成输出信号相位值到幅度值的转换，波形查找表的输出经过数模变换后传送至低通滤波器滤除杂散信号，产生纯净的正弦波。在合成所需的任意波形时，只需要将波形查找表中的正弦信号数据替换为一个周期的任意波形信号的幅度量化值，其余工作原理与产生正弦信号一致。

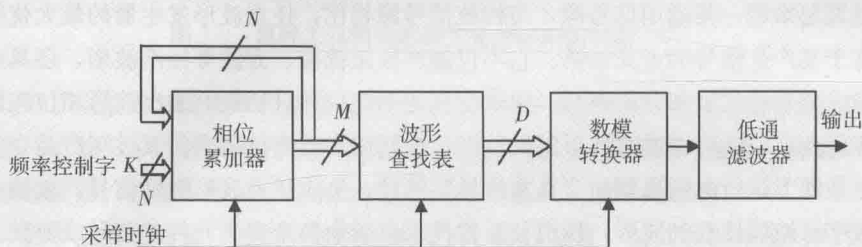


图 1-6 DDS 原理

从 DDS 的工作原理来看，任意波形的合成是信号捕获的一个逆过程；从应用的角度来看，任意波形合成技术的发展和指标需求也和信号采样与存储技术的发展密不可分。任意波形合成中的一些关键技术有下面几种。

1) 提高采样频率——根据奈奎斯特采样定理，任意波形合成技术所能重构信号的最高频率应小于采样时钟频率的一半。工程应用中，由于受杂散位置和低通滤波器非理想特性的限制，通常输出信号的最高频率取参考时钟频率（采样频率）的 40% 左右。采样率越高，所能模拟的信号带宽就越宽。根据 DDS 的原理，任意波形合成的最高取样率取决于相位累加器、波形查找表和数模转换器（Digital to Analog Converter, DAC）中的最低者。为了信号合成的灵活性，相位累加器一般采用可编程逻辑器件进行设计，而波形查找表选择可在线编程的存储器，如 SRAM、SDRAM、Flash 等。但是受集成电路工艺限制，各种器件的工作速率成为制约任意波形合成采样率提高的主要瓶颈。为了获得较高输出频率的激励信号，现代射频和微波系统应用中，通常要在输出级采用多级复杂的倍频或混频变换。这一方面增加了硬件的复杂性，另一方面混频带来的附加频率也容易引起信号失真。而提高采样频率、扩大信号直接输出的频率范围或带宽，不仅可以直接在时域内产生所需的激励信号，同时也可